



Mesures couplées de vibrations d'aile et de forces en régime turbulent

Gwenaël Acher, Ludovic Chatellier, Lionel Thomas, Benoit Tremblais,
Laurent David

► To cite this version:

Gwenaël Acher, Ludovic Chatellier, Lionel Thomas, Benoit Tremblais, Laurent David. Mesures couplées de vibrations d'aile et de forces en régime turbulent. CFTL2016, Sep 2016, Toulouse, France. hal-01369900

HAL Id: hal-01369900

<https://hal.science/hal-01369900>

Submitted on 21 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mesures couplées de vibrations d'aile et de forces en régime turbulent

Gwenaël Acher^{(1)*}, Ludovic Chatellier⁽¹⁾, Lionel Thomas⁽¹⁾, Benoit Tremblais⁽²⁾,
Laurent David⁽¹⁾

(1) Institut PPRIME, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA, France

(2) Institut XLIM, CNRS, Université de Poitiers, France

* gwenael.acher01@univ-poitiers.fr

Suite à l'observation de vibrations d'un profil NACA0015 soumis à un écoulement turbulent, une technique de mesure de surface d'un solide a été développée pour caractériser les modes vibratoires. Cet article présente en détail le fonctionnement de la technique HNC (Hauteur, Normale, Courbure) utilisée pour caractériser les déplacements du profil. La précision de la mesure de surface est évaluée et les déplacements sont mesurés pour des vitesses d'écoulement allant de 0.3 m/s à 2 m/s . Enfin les déplacements du profil sont corrélés avec des mesures d'efforts réalisées simultanément aux mesures de surface.

Introduction

Dans le cas de mesures d'écoulement turbulent autour d'un profil, celui-ci peut être amené à vibrer et/ou se déformer dans le cas d'une structure souple, sous l'excitation de l'écoulement. Les déplacements et les déformations doivent être caractérisés simultanément aux autres mesures faites soit sur le profil, soit dans l'écoulement pour effectuer le couplage entre le fluide et la structure.

De nombreuses méthodes de suivi de déplacements et de déformations des surfaces solides ont été développées et utilisées notamment pour la mesure de contraintes (Germaneau et al, 2009, Hild and Roux, 2006). Elle sont pour la plupart basées sur la corrélation d'images digitales (DIC). Ces techniques ont été également développées pour la caractérisation des interfaces fluides (Jöhle et al, 2008, Chatellier et al, 2013).

L'article présente une méthode optique de mesure de surface d'un solide dans un écoulement. Il s'agit, dans le cas présent, d'un profil NACA0015. La méthode HNC (Hauteur Normale, Courbure) présentée, est adaptée de Chatellier et al, 2013, qui l'a utilisée pour suivre la surface libre d'un écoulement visqueux sur une pente. La technique de mesure est basée sur la maximisation de la correspondance de deux images rétro-projetées sur la surface solide estimée. Cette étude a été motivée par l'observation de vibrations du profil lors de campagnes de mesures, présentées dans l'article Jeon et al, 2016. L'objectif de cet article est de présenter le fonctionnement de la méthode, d'en évaluer la précision et de caractériser la corrélation entre les mouvements du profil et les sollicitations mécaniques auxquelles celui-ci est soumis.

Dispositif expérimental

Un profil NACA0015, de corde $c = 80\text{ mm}$ et d'allongement $\lambda = 3$, moulé dans une résine rigide en Araldite chargée avec de la farine de silice (de module d'élasticité en traction et flexion proche de 12 GPa), est placé en incidence à $\alpha = 25^\circ$ dans un tunnel hydrodynamique de section transversale de $235 \times 235\text{ mm}^2$ fonctionnant en boucle fermée. Le profil, moulé autour d'une tige

d'acier inoxydable de diamètre 7 mm située au quart de corde tout le long de l'envergure, est fixé à une extrémité sur la balance Kistler. La vitesse de l'écoulement libre est variée entre 0.3 m/s et 2 m/s pour exciter la structure avec différentes amplitudes et divers modes de vibration. L'ensemble du montage expérimental est présenté sur la Figure 1.

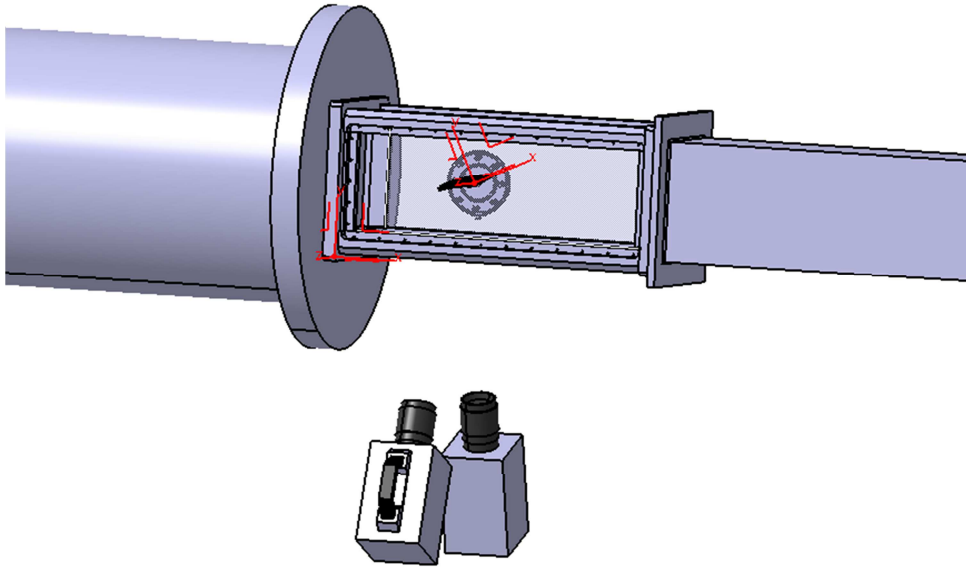


Figure 1 : Schéma de la configuration expérimentale

Afin de suivre son déplacement, le profil est peint avec un mouchetis, visible sur les Figure 2 et Figure 3, et illuminé en continu par une source de lumière blanche. Le déplacement de l'extrados a été enregistré à une fréquence de 1kHz à l'aide de deux caméras rapides Photron Fastcam SA1.1 (1MégaPixel) disposées à la verticale du profil avec un angle d'environ 20° dans le plan de l'envergure. Les deux caméras sont montées avec un dispositif de Scheimpflug et équipées d'objectifs Nikkor de 105mm, procurant une résolution de l'ordre de 10 pixels/mm. Une calibration est effectuée à l'aide d'une mire positionnée à l'horizontale et déplacée verticalement dans le volume, afin de déterminer les paramètres du modèle de caméra sténopé utilisé pour l'analyse de la surface. L'erreur en rétroprojection du modèle de caméra est estimée à 0.4 pixels.

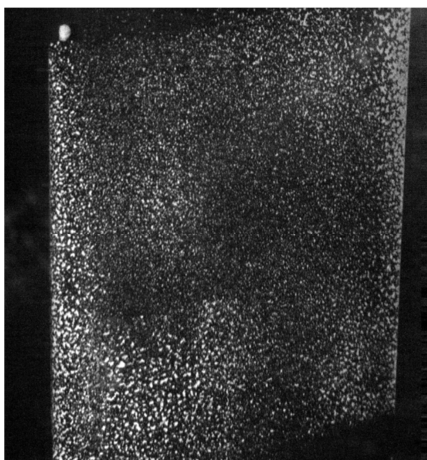


Figure 2: Image de l'aile par la caméra 1

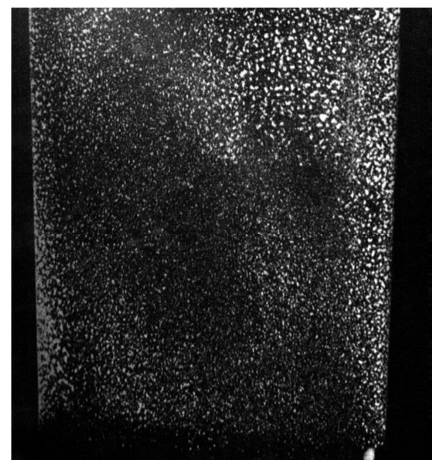


Figure 3 : Image de l'aile par la caméra 2

Simultanément, les trois composantes de la force et la composante transversale des moments exercés sur le profil sont enregistrées au moyen d'une balance Kistler 9272 associée à un amplificateur Kistler 5070A pour convertir les charges du capteur piézoélectrique en tension.

Les acquisitions optiques ont été réalisées à une cadence de 1 *kHz* pendant 30 secondes, et les mesures de forces, synchronisées avec les caméras, ont été réalisées à une cadence de 4 *kHz* pendant 5 minutes.

Mesure de surface avec la méthode HNC

Pour cette étude, la méthode HNC a été utilisée pour reconstruire l'extrados du profil. Elle est adaptée pour le suivi de structure de Chatellier et al (2013), qui l'a utilisée pour le suivi du déplacement d'une surface libre. La procédure de reconstruction de surface est décrite dans les paragraphes suivants.

Un maillage (x_0, y_0) , raffiné dans notre cas au bord d'attaque et au bord de fuite, est tout d'abord créé dans le plan de référence du domaine fluide/solide $Z = 0$. Les points (x_0, y_0) constituent les points d'intérêt physique où la position du profil (hauteur z), sa normale et sa courbure vont être calculées. Une fenêtre d'interrogation, de taille N_x, N_y , avec des éléments de taille dx, dy est définie autour de chaque point physique. Cette fenêtre constitue le support sur lequel les images des caméras sont rétro-projetées et sur lesquelles l'inter-corrélation est effectuée.

La première étape de la reconstruction est de calculer un prédicteur pour l'optimisation à venir. Il s'agit de trouver, à ce point, l'altitude approximative à laquelle se situe le profil pour réduire la zone de recherche du maximum de corrélation, lors de l'optimisation à venir. En pratique, un vecteur d'altitude $z \in [z_{min}, z_{max}]$ avec un pas dz est créé et, pour chaque point (x_0, y_0) , une grille (x, y, z) telle que $x \in [x_0 - \frac{N_x-1}{2}, x_0 + \frac{N_x-1}{2}]$, $y \in [y_0 - \frac{N_y-1}{2}, y_0 + \frac{N_y-1}{2}]$ est définie. La paire d'image est rétro-projetée sur cette grille afin de fournir deux images dans le plan physique à une altitude constante z . Enfin une inter-corrélation est effectuée pour caractériser la similitude des images. Ce processus est répété pour chaque valeur z du vecteur d'altitude et l'altitude z_0 correspondant à la meilleure corrélation est conservée pour être utilisée comme prédicteur. En effet, les deux images étant des projections d'un motif unique sur la surface, le coefficient d'inter-corrélation normalisée doit tendre vers 1 quand la rétroprojection est faite sur une surface s'approchant de celle du solide étudié.

La seconde étape à réaliser est la maximisation de la corrélation par l'algorithme du simplexe. Le principe de fonctionnement de cette étape se rapproche de celui de la précédente opération. Les deux nouveautés sont les suivantes: la surface sur laquelle les images sont rétro-projetées n'est plus un plan d'altitude constante, mais inclinée et courbée et la maximisation de la corrélation est effectuée par l'algorithme itératif du simplexe.

La surface autour du point (x_0, y_0) , toujours avec définie par (x, y, z) tels que $x \in [x_0 - \frac{N_x-1}{2}, x_0 + \frac{N_x-1}{2}]$, $y \in [y_0 - \frac{N_y-1}{2}, y_0 + \frac{N_y-1}{2}]$ est calculé comme suit:

$$z = z_0 + \underbrace{\frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy}_{\text{Ordre 0}} + \underbrace{\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} dx^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} dy^2}_{\text{Ordre 1}} \quad (1)$$

Ordre 2

Les images sont interpolées sur la surface courbe (x, y, z) puis corrélées entre elles afin de déterminer leur niveau de similarité. L'algorithme du simplexe optimise les paramètres $[z_0]$ à l'ordre 0,

$[z_0, \partial z/\partial x, \partial z/\partial y]$ à l'ordre 1 et $[z_0, \partial z/\partial x, \partial z/\partial y, \partial^2 z/\partial x \partial y, \partial^2 z/\partial x^2, \partial^2 z/\partial y^2]$ à l'ordre 2, afin d'obtenir les paramètres de meilleure corrélation. L'ensemble de cette procédure est développé en C++ à partir de la bibliothèque SLIP (Tremblais et al, 2010).

Traitement des données

La reconstruction de la surface pour le cas d'étude a été réalisée en deux étapes afin d'améliorer la qualité de la reconstruction et de l'accélérer. Un prédicteur est tout d'abord calculé et la procédure décrite précédemment est appliquée avec ce prédicteur plus pertinent.

Tout d'abord, une première reconstruction de l'extrados a été effectuée sur la première paire d'images, en scannant la hauteur totale du champ où se situe le profil (entre -14mm et 2mm). La corrélation est maximisée et la position du profil est déterminée. Cependant, une telle zone de recherche est coûteuse en temps et le risque de convergence vers des maximums de corrélation non physique est accru, notamment proche du bord d'attaque et du bord de fuite. En effet, des paramètres d'altitude et courbure éloignés de la réalité peuvent produire des projections qui sont en dehors du motif réalisé sur le profil d'aile et générer des corrélations normalisées plus élevées que la solution physique. La forme du profil étant connue analytiquement, ce premier calcul de surface sert de référence pour l'ajustement d'un profil NACA0015 moyen. Ainsi pour chaque point (x_0, y_0) , une altitude théorique $z_{\text{prédicteur}}$ est calculée à partir de l'équation de profil pour servir de prédicteur pour le calcul de toutes les images de la série. Le prédicteur sert à réduire la zone de recherche initiale à $[z_{\text{prédicteur}} - 1\text{mm}; z_{\text{prédicteur}} + 1\text{mm}]$. Ainsi la première étape de recherche d'altitude est accélérée et le risque de converger vers un faux maximum est réduit. Le $\Delta z = 1\text{mm}$ choisi est le fruit d'un compromis entre une zone de recherche petite qui accélère le calcul et réduit le risque de convergence vers un faux maximum, et une zone de recherche suffisamment grande pour contenir les variations d'altitudes dues aux mouvements du profil; ceci afin d'initialiser l'optimisation le plus finement possible. La surface obtenue est présentée en Figure 4.

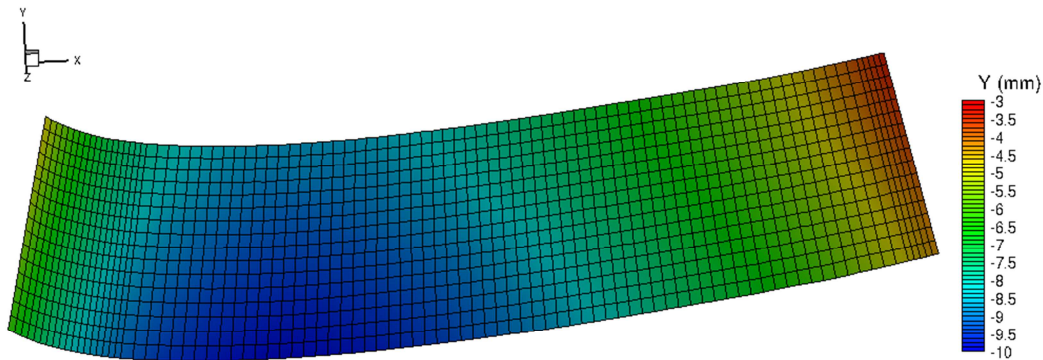


Figure 4 : Surface reconstruite à l'aide de HNC

Résultats

Les résultats présentés contiennent des données statistiques sur l'ensemble des cas d'études et détaillent un cas d'écoulement à 2.04 m/s où l'on observe des vibrations d'amplitude importante. Pour l'analyse des résultats, le repère choisi un repère local (X, Y, Z) issu d'une rotation de 25° autour de l'axe Z_0 du repère lié à la veine (voir Figure 1).

Pour chaque point d'intérêt, la mesure de l'altitude du profil y est composée de trois termes: l'altitude moyenne du point, la fluctuation d'altitude liée au mouvement et/ou à la déformation du profil et un terme d'erreur de mesure. L'amplitude des deux derniers termes peut être caractérisée à

l'aide de l'écart quadratique moyen sur l'altitude des points de mesure. Cet écart, présenté à la Figure 5, ne permet pas d'évaluer l'erreur sur la mesure puisqu'il n'est pas possible de discriminer la contribution de chaque terme à la fluctuation de la mesure. Cependant, l'erreur de reconstruction étant liée à la qualité du motif, à la qualité des images et à l'algorithme utilisé, elle est constante quelque soit le régime d'écoulement étudié. De plus, à faible vitesse, la structure n'est soumise qu'à de très faibles sollicitations mécaniques qui produisent des vibrations de petite amplitude. La contribution de la fluctuation d'altitude peut donc être négligée à bas régime et l'incertitude sur la mesure peut être estimée par la valeur de l'asymptote, soit $2\sigma = 0.03 \text{ mm}$.

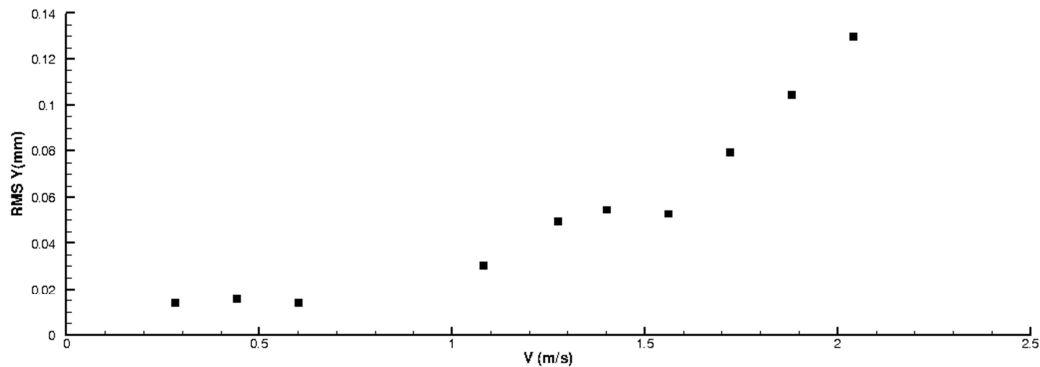


Figure 5 : Ecart quadratique moyen de l'altitude des points de mesure sur l'aile en fonction de la vitesse de l'écoulement infini V

Afin d'analyser les déplacements de l'aile, on assimile la surface reconstruite à une succession de profil NACA0015 répartis le long de l'envergure (plans $z = \text{constante}$). La corde est fixée à 80 mm , tandis que l'incidence et la position du quart de corde (x, y) sont laissées libres. Le profil est ajusté une nouvelle fois à l'aide de l'algorithme du simplex. Cette fois l'écart quadratique moyen de l'altitude entre le profil théorique et les points expérimentaux est minimisé sur les trois variables $[\alpha, x, y]$. L'approximation de la surface par un profil NACA est présentée en Figure 6, pour la section médiane $z = 0 \text{ mm}$, à une vitesse d'écoulement $V = 2.04 \text{ m/s}$.

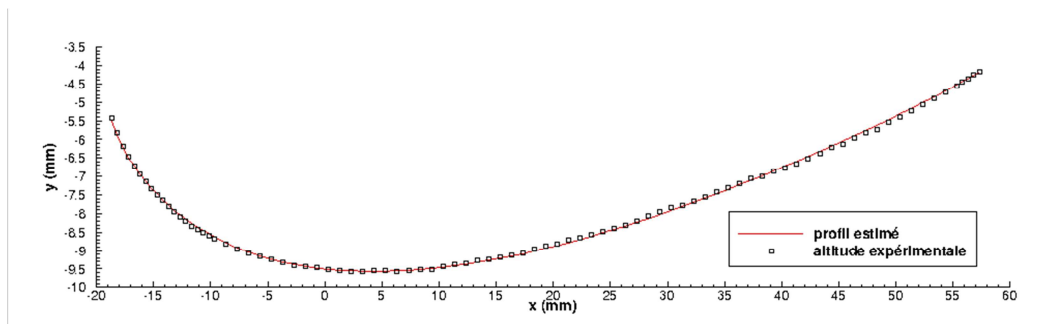


Figure 6: Approximation des points expérimentaux par un profil NACA0015

La qualité de l'approximation de la surface par le NACA0015 est constante avec la vitesse d'écoulement et est caractérisée par une racine carré de la somme des carrés des résidus ne dépassant pas 0.072 mm . Cet écart contient d'une part l'erreur de mesure caractérisée auparavant et d'autre part un écart dû au fait que le profil expérimental n'est pas parfaitement défini par un profil NACA0015 théorique (principalement en raison de la qualité du moulage). Cependant l'approximation est de suffisamment bonne qualité pour caractériser le déplacement du profil par ses trois variables de position $[\alpha, x, y]$.

L'incidence locale du profil α et la position du quart de corde (x, y) sont évalués et les moyennes des trois variables $[\alpha, x, y]$ sont présentées pour la section médiane respectivement en Figure 7, Figure 8 et Figure 9, avec l'écart quadratique moyen modélisé par les barres d'erreur, en fonction de la vitesse de l'écoulement infini V .

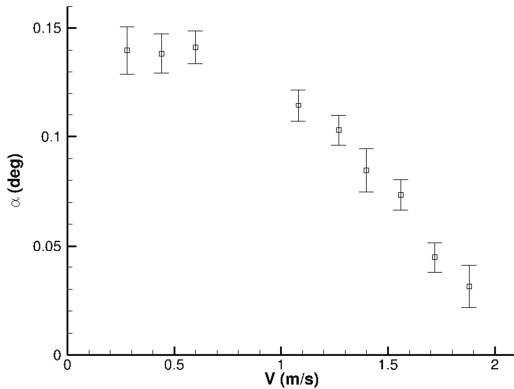


Figure 7 : Incidence locale $\alpha(V)$ moyenne dans le plan médian du profil en fonction de la vitesse V

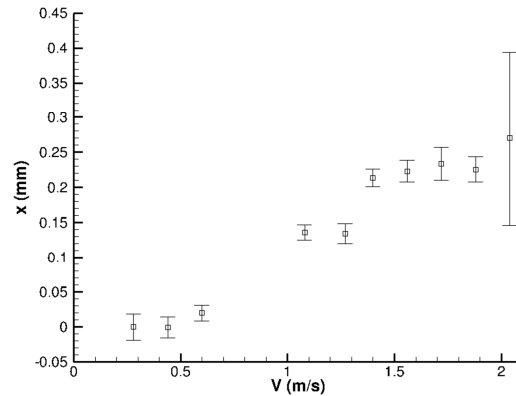


Figure 8 : Position moyenne du quart de corde $x(V)$ dans le plan médian du profil en fonction de la vitesse V

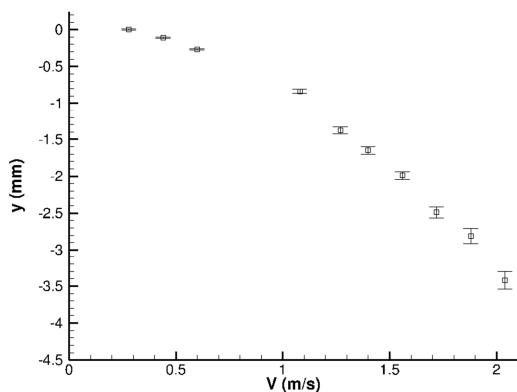


Figure 9 : Altitude $y(V)$ moyenne du quart de corde dans le plan médian du profil en fonction de la vitesse V

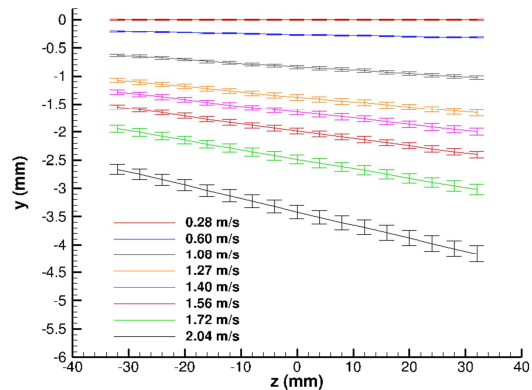


Figure 10 : Altitude moyenne locale $y(z)$ du quart de corde du profil aux différentes vitesses étudiées en fonction de z

Afin d'évaluer l'incertitude sur l'estimation de la position globale du profil, l'écart quadratique moyen est calculé. Pour les raisons citées précédemment, l'incertitude sur l'ajustement du profil est évalué dans les configurations à faible vitesse d'écoulement. L'incertitude à 2σ est majorée par $[0.025^\circ, 0.06 \text{ mm}, 0.02 \text{ mm}]$ respectivement pour $[\alpha, x, y]$.

La variation des paramètres, est causée par la charge hydrodynamique appliquée sur l'aile. Elle peut se décomposer en une charge moyenne et une charge instationnaire qui provoque l'oscillation du profil autour d'une position moyenne déterminée par la charge moyenne.

Cette assimilation de l'aile à un ensemble de profils répartis en envergure s'avère utile pour l'interprétation des résultats en terme de modes de flexion et vibration. En effet on remarque que le mouvement du profil se décompose en trois mouvements principaux: une flexion portée par l'axe y du profil, accompagnée par une torsion autour de l'axe du profil et un mode de vibration porté par la

composante x du profil, principalement marqué au régime 2 m/s . La flexion a une intensité moyenne de l'ordre de 3.5 mm à une vitesse d'écoulement de 2 m/s et oscille autour de cette valeur avec une amplitude de 0.6 mm pic à pic. La torsion, faible par rapport aux autres déplacements, a une amplitude moyenne de 0.2° et varie temporellement dans un gamme de $\pm 0.05^\circ$. Le déplacement selon x , quant à lui, a une composante moyenne faible de l'ordre de 0.2 mm tandis que l'amplitude de la vibration est de 0.4 mm pic à pic. De plus, cette vibration n'apparaît qu'à 2 m/s , pour des vitesses inférieures la vibration est de très faible intensité.

La Figure 10 présente clairement le phénomène de flexion de l'aile le long de l'envergure du profil. Elle est caractérisée par une flexion croissante avec l'augmentation du régime et avec la distance entre la section d'étude et le point de fixation du profil sur la balance. L'amplitude des déplacements instationnaires, caractérisés par l'écart quadratique moyen sur l'altitude évolue de manière similaire.

Afin de corréler les déplacements avec les efforts mesurés à l'aide de la balance, les forces sont projetées dans le repère local de l'aile défini précédemment. La Figure 11 présente l'évolution temporelle du moment fluctuant selon l'axe du profil et de l'angle de torsion du profil dans la section moyenne, à une vitesse de 2 m/s . Les Figure 12 et Figure 13 présentent l'évolution des efforts fluctuants et des déplacements associés.

Les courbes présentent une forte corrélation entre les déplacements et les efforts; un moment selon l'axe z du profil se traduit par une rotation du profil, et les efforts selon x et y se traduisent par un déplacement selon les directions subissant l'effort. Les coefficients de corrélations sont de 0.90 entre l'incidence locale du profil et le moment sur l'axe, 0.90 entre F_y et y et de 0.99 entre F_x et x .

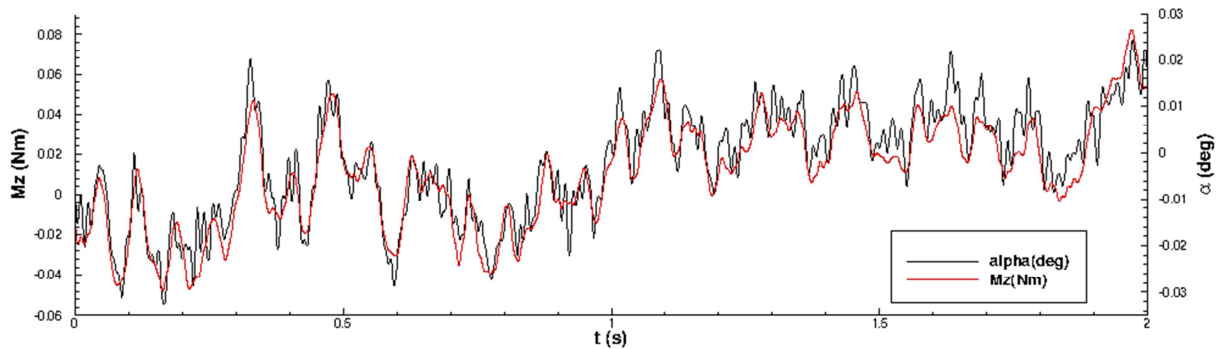


Figure 11 : Comparaison entre le moment sur l'axe M_z du profil et son incidence α

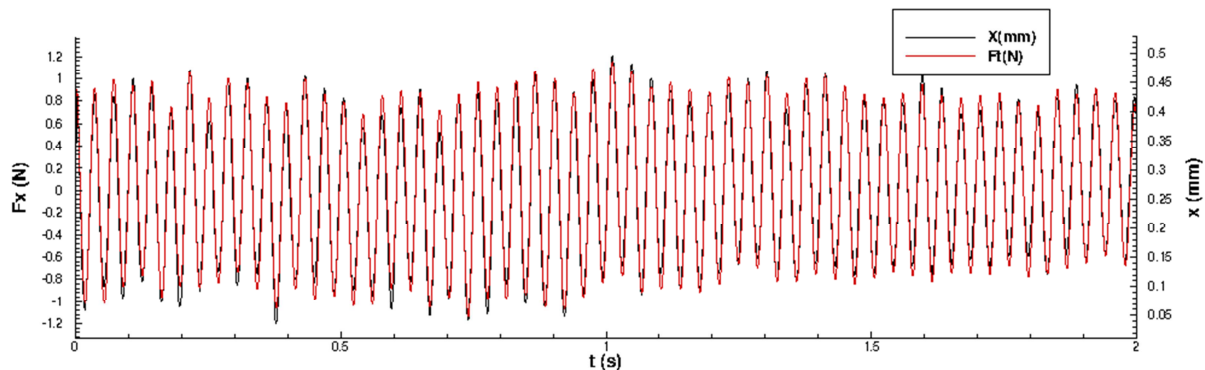


Figure 12 : Comparaison entre la force tangentielle F_x et le déplacement en x du profil

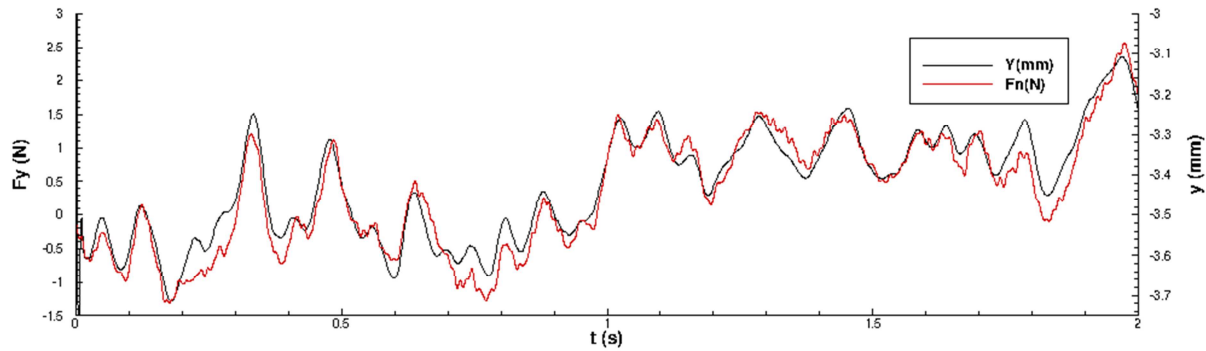


Figure 13 : Comparaison entre la force normale F_y au profil et son déplacement y

Conclusion

Lors de l'analyse de l'écoulement autour d'un obstacle, il est primordial de connaître précisément la géométrie de l'objet d'étude, en particulier lorsque celle-ci évolue au cours du temps. Dans cet article, la méthode HNC a été présentée et utilisée avec succès pour déterminer la position de la surface d'un solide en mouvement dans le cas d'un écoulement autour d'un NACA0015. La mesure de la surface du profil, excitée par l'écoulement, a été réalisée avec une précision supérieure à $30\mu\text{m}$, soit environ 0.3 pixels . Les déplacements de l'aile ont été caractérisés à des vitesses d'écoulement comprises entre 0.3 m/s et 2 m/s et confrontés aux efforts subis par le profil. Les mouvements du profil sont corrélés à plus de 90% avec les forces qui lui sont appliquées.

Cette technique de mesure, non intrusive puisqu'il s'agit d'une mesure optique, peut être utilisée pour suivre le déplacement d'un profil flexible en association avec des mesures fluide de vitesse et de pression afin d'étudier les interactions entre fluide et structure.

Remerciements

Les travaux de thèse de G. Acher ont été financés par la Direction Générale de L'Armement.

Références

- [1] A. Germaneau, P. Doumalin, J.-C. Dupre, C. Breque, S. D'Houtaud, P. Rigoard. «Analyse 3D du comportement mécanique de l'os pour l'étude de fixations occipito-cervicales.» *19ème Congrès Français de Mécanique*. Marseille, 2009.
- [2] Jehle, M., S. Jarny, L. David. «Différentes approches pour la mesure d'interfaces et de surface libre.» *11ème Congrès Francophone de Techniques Lasers*. Poitiers, France, 2008.
- [3] L. Chatellier, S. Jarny, F. Gibouin, L. David. «A parametric PIV/DIC method for the measurement of free surface flows.» *Experiments in Fluids* 54, n° 3 (2013): 1-15.
- [4] Tremblais B., David L., Arrivault D., Dombre J., Chatellier L., et Thomas L. *Slip : Simple library for image processing (version 1.4)*. 2010. <http://sliplib.free.fr/>.
- [5] YJ. Jeon, T. Earl, P. Braud, L. Chatellier, L. David. «Mesures du champ de pression autour d'un Naca0015 par TomoPIV résolue en temps.» *15ème CFTL*. Toulouse, France, 2016.
- [6] Hild F. and Roux S. «Digital image correlation from displacement measurement to identification of elastic properties: a review.» *Strain*, 2006: 69-80.